

7. INFILTRAÇÃO

7 - INFILTRAÇÃO

7.1 - Conceituação Geral

Uma gota de chuva pode ser interceptada pela vegetação ou cair diretamente sobre o solo. A quantidade de água interceptada somente pode ser avaliada indiretamente e é normalmente pequena em relação a precipitação total.

A água que atinge o solo poderá evaporar, penetrar no solo ou escoar superficialmente. A quantidade evaporada durante as chuvas intensas é desprezível em relação ao total precipitado.

A água infiltrada sofrerá a ação de capilaridade e será retida nas camadas superiores do solo se esta prevalecer sobre a força da gravidade. A medida que o solo se umedece a força da gravidade passa a prevalecer e a água percola em direção às camadas mais profundas. O conhecimento deste processo é essencial para o dimensionamento de projetos de irrigação e será visto em maiores detalhes em outra seção deste texto.

Os principais fatores que influem no processo de infiltração são:

- **umidade do solo** - quanto mais saturado estiver o solo, menor será a infiltração.
- **geologia** - a granulometria do solo condiciona a sua permeabilidade. Quanto mais fino for o solo menor será a infiltração.
- **ocupação do solo** - os processos de urbanização e devastação da vegetação diminuem drasticamente a quantidade de água infiltrada ocorrendo o contrário com a aplicação de técnicas adequadas de terraceamento e manejo do solo.
- **topografia** - declives acentuados favorecem o escoamento superficial direto diminuindo a oportunidade de infiltração.
- **depressões** - a existência de depressões provoca a retenção da água diminuindo a quantidade de escoamento superficial direto. A água retida infiltra no solo ou evapora.

7.2 - Métodos de Avaliação

Apresenta-se a seguir os diversos métodos para quantificar a infiltração no solo.

a) Fórmula de Horton

O fenômeno da infiltração pode ser representado matematicamente pela conhecida fórmula de HORTON, que é a seguinte:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-kt} \quad (7.1)$$

f_0 = taxa de infiltração no instante inicial, em mm/h
 f_c = taxa de infiltração constante quando $t \gg 4$, em mm/h
 f = taxa de infiltração no tempo t , em mm/h
 k = constante que depende do tipo de solo
 t = intervalo de tempo em horas

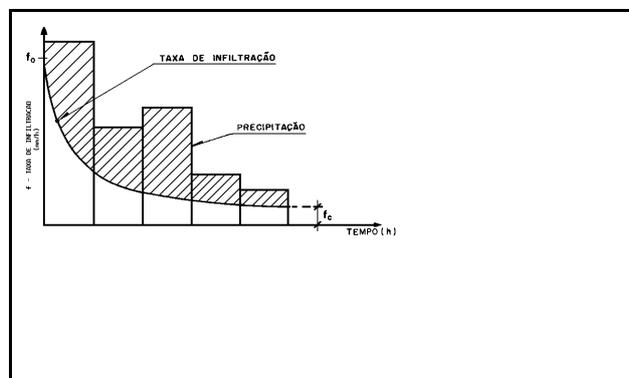


Figura 7.1 - VARIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO COM O TEMPO SEGUNDO HORTON

A expressão só é válida quando o suprimento de água ao solo é sempre superior a taxa de infiltração conforme indicado na Figura 7.1.

Nesta figura a área hachurada indica a parcela da chuva que não se infiltra e que portanto irá se transformar em escoamento superficial direto.

A quantidade de água infiltrada até o instante "t" é dada pela integral da expressão 7.1

$$F(t) = \int_0^t [f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt}] dt$$

ou seja:

$$F(t) = f_c \cdot t + \frac{f_0 - f_c}{k} - \frac{f_0 - f_c}{k} \cdot e^{-kt} \quad (7.2)$$

A expressão permite calcular a quantidade de água infiltrada quando ocorre uma chuva de intensidade i ($i > f$) e duração t desde que se conheçam os valores de f_0 , f_c e k . Indicações destes valores serão fornecidas adiante.

b) Método Índice τ

Outro método simples de uso bastante corrente é o chamado "método do índice τ ". O índice τ nada mais é do que a taxa de infiltração "f" suposta constante ao longo do tempo conforme indica a Figura 7.2.

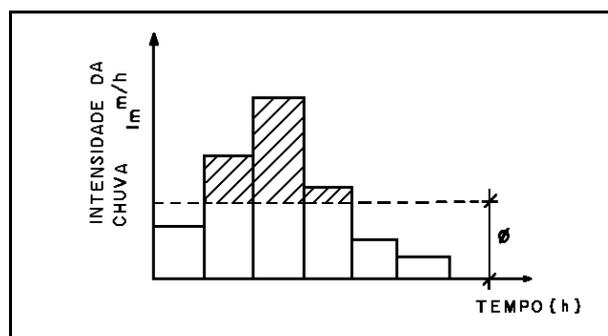


Figura 7.2 - ÍNDICE ι DE INFILTRAÇÃO

O índice ι , embora seja uma aproximação grosseira do modelo de HORTON, pode ser utilizado sem introduzir grandes erros em estudos de cheias pois usualmente ocorrem quando o solo já foi umedecido por chuvas anteriores. Neste caso o valor inicial f_0 de HORTON aproxima-se de f_c o que torna a hipótese de ι - cte mais realista.

O índice ι pode ser determinado quando se dispõe de registros simultâneos de chuva e vazão como indicado na Figura 7.3.

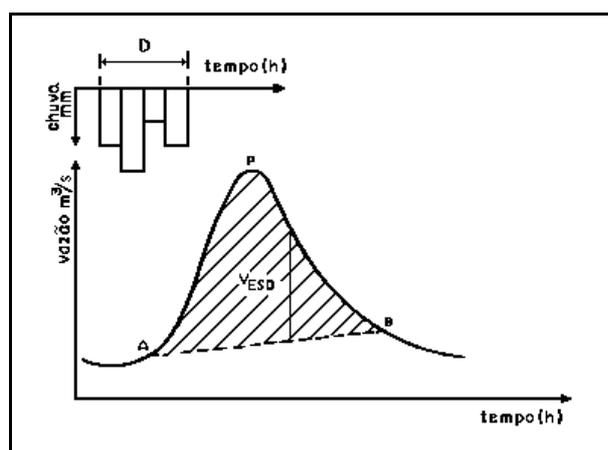


Figura 7.3 - DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE ι

Nessa Figura tem-se:

D = duração da chuva, em horas;

H = chuva total precipitada durante o tempo D, em mm;

VESD = volume de escoamento superficial direto (área da figura APB), em m^3 .

Sendo "A" a área da bacia hidrográfica tem-se:

volume total precipitado

$$VT = A \times H$$

volume do Escoamento Superior Direto

$$VESD = \text{área ABP}$$

Volume Infiltrado

$$VI = VT - VESD$$

Lâmina Infiltrada

$$LI = VI/A$$

Índice

$$\iota = LI/D$$

Quando se dispõe de diversos registros como os da Figura 7.3 o índice τ médio representa uma estimativa bastante confiável das perdas médias por infiltração.

c) Métodos do SCS

Outro método de utilização corrente que se aplica especialmente quando não se dispõem de dados hidrológicos é o do "Soil Conservation Service" (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Este método foi adaptado para as condições do Estado de São Paulo e acha-se descrito em detalhes no boletim técnico do DAAE V2 n°2 Mai/Ago 1979 - pág. 82.

A fórmula proposta pelo SCS é:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, P > 0,2S \quad (7.3)$$

Q = escoamento superficial direto em mm

P = precipitação em mm

S = retenção potencial do solo em mm

O valor de "S" depende do tipo e da ocupação do solo e pode ser determinado facilmente por tabelas próprias.

A quantidade de 0,2S é uma estimativa de perdas iniciais (A_i) devidas à interceptação e retenção em depressões. Por esta razão impõe-se a condição $P > 0,2S$.

Para facilitar a solução da equação 7.3 faz-se a seguinte mudança de variável:

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25.4}} \quad (7.4)$$

CN é chamado de "número de curva" e varia entre 100 e 0.

O parâmetro CN depende basicamente dos seguintes fatores:

- c.1 - Tipo de solo
- c.2 - Condições de uso e ocupação do solo
- c.3 - Umidade antecedente do solo

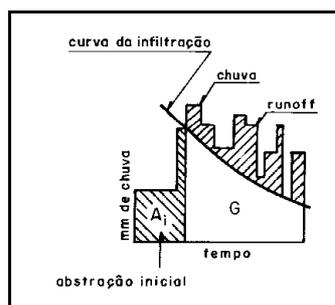


Figura 7.4

$$Q = \frac{(P - A_i)^2}{P - A_i + S}$$

com $P \geq A_i$; $S \geq A_i + G$
e $G = P - A_i - Q$

as curvas deste gráfico são para o caso $A_i = 0,2S$ de modo que

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

c.1 - Tipos de solo e condições de ocupação

O SCS distingue em seu método 4 grupos hidrológicos de solos. A adaptação do trabalho daquela entidade para o Estado de São Paulo, mencionada, classificou 5 tipos de solos como se segue:

Embora adaptada para as condições do Estado de São Paulo a classificação que se segue é bastante geral e poderá ser aplicada a outras regiões do Brasil.

GRUPO A - Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a uns 8%, não há rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.

GRUPO B - Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas este limite pode subir a 20% graças a maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial.

GRUPO C - Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30% mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidades de 1,2m. No caso de terras roxas, estes dois limites máximos podem ser 40% e 1,5m. Nota-se a cerca de 60cm de profundidade camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.

GRUPO D - Solos argilosos (30 - 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50cm de profundidade. Ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

GRUPO E - Solos barrentos como C, mas com camada argilosa impermeável ou com pedras. Pode também não possuir tal camada, mas apresenta teor total de argila superando 40%. No caso de terras roxas este teor pode alcançar 60% (no caso D, 45%).

c.2 - Condições de Uso e Ocupação do Solo

A Tabela 7.1 a seguir fornece valores de CN para os diferentes tipos de solo e respectivas condições de ocupação.

Essa Tabela refere-se à condição II de umidade antecedente do solo.

c.3 - Condições de Umidade Antecedente do Solo

O método do SCS distingue 3 condições de umidade antecedente do solo:

CONDIÇÃO I - solos secos - as chuvas nos últimos 5 dias não ultrapassam 15mm.

CONDIÇÃO II - situação média na época das cheias - as chuvas nos últimos 5 dias totalizaram entre 15 e 40mm.

CONDIÇÃO III - solo úmido (próximo da saturação) - as chuvas nos últimos 5 dias foram superiores a 40mm e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação.

A Tabela 7.2 permite converter o valor de CN para condição I ou III, dependendo das necessidades do projetista.

TABELA 7.1 - Numeração das Curvas de Escoamento Superficial de Chuvas Intensas Conforme o Complexo Hidrológico do Solo com a sua Cobertura Vegetal (Condição II de umidade antecedente)

COBERTURA VEGETAL OU OU TIPO DE USO DO SOLO	DEFESA CONTRA A EROSÃO	SITUAÇÃO HIDROLÓGICA DA INFILTRAÇÃO	GRUPO HIDROLÓGICO DO SOLO				
			A	B	C	D	E
Arado, quase sem cobertura vegetal	SR C	Boas Boas	65	80	88	92	95
			65	78	88	90	92
Cultivos de ciclo curto e arações frequentes	SR	Más	80	72	81	87	90
	SR	Boas	52	66	75	82	85
	C	Más	56	65	78	84	87
	C	Boas	48	60	72	78	82
	CT	Más	52	62	74	80	84
	CT	Boas	45	55	67	75	80
Cultivos de ciclo médio, arações anuais	SR	Más	58	65	73	82	88
	SR	Boas	54	62	70	79	85
	C	Más	55	64	72	78	84
	C	Boas	50	60	67	75	83
	T	Más	52	62	70	77	82
	T	Boas	48	55	65	73	80
Semeação densa ou a lanço; cobertura curta, mas densa, como a das leguminosas e dos postos em rodízio	SR	Más	56	64	72	80	86
	SR	Boas	50	58	66	76	82
	C	Más	54	60	69	76	83
	C	Boas	48	56	64	72	80
	T	Más	50	58	65	75	80
	T	Boas	40	52	60	70	70
Pastagem velha com arbustos	C C C	Más	65	70	78	85	90
		Médias	60	66	75	82	87
		Boas	56	62	72	79	84
		Más	55	62	70	78	86
		Médias	42	59	67	75	82
		Boas	50	56	64	72	79
Mata, Capoeira velha		Más	32	40	55	67	76
		Boas	18	25	42	58	70
Gramados tratados		Más	65	72	78	84	88
		Boas	59	67	74	81	86
Estradas de terra	SR	Más	80	85	90	93	95
	C	Boas	74	80	86	90	92

SR = sulcos retos

C = cultivo acompanhando as curvas de nível
T = terraceamento

TABELA 7.2- Conversão das Curvas CN para as diferentes Condições de Umidade do solo

NUMERAÇÃO DAS CURVAS PARA AS CONDIÇÕES DE SATURAÇÃO		
I	II	III
100	100	100
87	95	99
78	90	98
70	85	97
63	80	94
57	75	91
51	70	87
45	65	83
40	60	79
35	55	75
31	50	70
27	45	65
23	40	60
19	35	55
15	30	50
12	25	45
9	20	39
7	15	33
4	10	26
2	5	17
0	0	0

c.4 - Roteiro de Cálculo

- 1 - Determinar as condições de saturação do solo;
- 2 - Determinar grupo hidrológico do solo;
- 3 - Através da Tabela 7.1 da cobertura vegetal e do grupo hidrológico, determinar o CN para a condição II;
- 4 - Transformar o CN para a condição desejada pela Tabela 7.2;
- 5 - Uma vez com a curva CN conhecida e com a precipitação total, a Figura 7.4, fornece o escoamento superficial.

d) Coeficientes da fórmula de Horton oriundos da classificação hidrológica dos solos

A experiência do SCS permite a indicação de valores aproximados de f_0 , f_c e k da fórmula de HORTON (ver Tabela 7.3).

TABELA 7.3- Aplicação da Fórmula de Horton para Diferentes Tipos de Solos

--

Parâmetros da Fórmula de Horton	Classificação Hidrológica do Solo (SCS)			
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
taxa de infiltração inicial do solo seco: f_0 (mm/h)	250	200	130	80
taxa de infiltração final do solo úmido: f_c (mm/h)	25	13	7	3
fator de forma-expoente K	2	2	2	2

d) Medição Direta da Capacidade de Infiltração

A maneira mais precisa de determinar a capacidade de infiltração é através da medição da diferença entre a quantidade de água precipitada e o escoamento superficial, o que pode ser feito por meio de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas representativas. Para o caso de irrigação não há necessidade de muita precisão, podendo-se determiná-la com o auxílio de infiltrômetro, que é mais rápido. Tais infiltrômetros podem ser de dois tipos: de inundação e de aspersão.

O infiltrômetro de inundação consta de dois anéis concêntricos medindo respectivamente ao redor de 40 a 16 cm de diâmetro que são cravados no terreno até uma profundidade de 10 a 15 cm. A cravação não deve ser feita por percussão, o que além de provocar a penetração irregular do cilindro, vai rompendo a estrutura da camada de solo em contato com o cilindro. A melhor maneira é utilizar um macaco hidráulico, que é colocado sobre uma tábua apoiada no cilindro. A finalidade do cilindro externo é manter verticalmente o fluxo de água do cilindro interno, onde é feita a medição da capacidade de infiltração. Aplica-se água em ambos os cilindros mantendo uma lâmina líquida de 1 a 5 cm, sendo que no cilindro interno mede-se o volume aplicado a intervalos fixos de tempo. A figura 7.5 mostra um esquema da instalação para medição da capacidade de infiltração do solo com o infiltrômetro de inundação, evidenciando o efeito do cilindro externo na manutenção do fluxo vertical da água do cilindro interno.

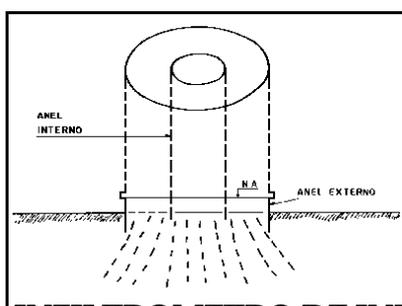


Figura 7.5 - INFILTROMETRO DE INUNDAÇÃO

Uma maneira bastante prática de se manter o nível d'água e proceder as medições do volume infiltrado no cilindro interno é utilizar um garrafão graduado, emborcado. Tal garrafão possui uma rolha com um tubo de tal sorte que deslocando-se tal tubo, pode-se manter a lâmina d'água na altura desejada.

Imediatamente após iniciada a aplicação de água, aciona-se o cronômetro e a intervalos fixos de tempo, geralmente 10 minutos, procede-se à leitura do nível d'água no garrafão. A medição deve prosseguir até que a variação do nível d'água com o tempo permaneça praticamente constante. Para o cálculo da capacidade de infiltração emprega-se a seguinte equação:

$$V = h \cdot a \quad (7.6)$$

onde:

V = volume infiltrado durante o tempo t, em cm³;

a = área do cilindro interno, em cm²;

h = altura de água infiltrada, em cm.

Pode-se portanto obter:

$$h = \frac{V}{a} \quad (7.7)$$

Para calcular a capacidade de infiltração basta, transformar o valor "h", altura de infiltração, em "f", capacidade de infiltração, que é expressa em mm/h, pela relação:

$$f = \frac{60 h}{t} \quad (7.8)$$

Os resultados obtidos com o infiltrômetro de inundação não são absolutos, devido aos seguintes fatores:

- a) ausência do efeito da compactação produzido pela água da chuva;
- b) efeito do ar retido no tubo;
- c) deformação da estrutura do solo devido a cravação do cilindro. Para efeito das avaliações necessárias para fins de irrigação os resultados obtidos com o procedimento acima, são plenamente satisfatórios.